

EVALUACIÓN AUTOMATIZADA DE LA COORDINACIÓN Y DESTREZA MANUAL FINA USANDO SERIOUS GAMES

Edwin Daniel Oña*, Carlos Balaguer, y Alberto Jardón
Universidad Carlos III de Madrid
*eona@ing.uc3m.es

Resumen

Actualmente, los procedimientos de evaluación funcional se caracterizan por ser laboriosos, con poca digitalización de resultados, y una reducida adaptabilidad a las necesidades particulares de los pacientes. En este artículo, se presenta una novedosa línea de investigación enfocada en la automatización de escalas clínicas de evaluación funcional de la extremidad superior utilizando “serious games” y realidad virtual (RV). Se describe el proceso de automatización usando RV de tres escalas clínicas como el “Box and Blocks Test” (BBT), el “Clothespin Relocation Test” (CRT), y el “Peg Solitaire” ampliamente usadas para medir el nivel de destreza manual durante neurorehabilitación.

Palabras clave: Realidad virtual, Rehabilitación, Destreza manual, Automatización

1. Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Banco Mundial, en el Informe Mundial sobre la Discapacidad, define la rehabilitación como: “un conjunto de medidas que ayudan a las personas que tienen o probablemente tendrán una discapacidad a conseguir y mantener el funcionamiento óptimo en interacción con su ambiente-[19]. Las poblaciones que requieren de servicios de rehabilitación son muy variadas, siendo las afectadas por patologías neurológicas una de las más demandantes.

La neurorehabilitación en particular tiene como objetivo optimizar la participación de una persona en la sociedad, así como su sensación de bienestar [14]. Esta definición destaca características relevantes del proceso, tales como que no es un tipo particular de intervención; el foco está en el paciente como persona; los objetivos se relacionan con el funcionamiento social, así como con la salud o el bienestar; no es un proceso restringido a pacientes que pueden recuperarse, parcial o completamente, sino que se aplica a todos los pacientes que quedan con problemas a largo plazo.

Sin embargo, el término rehabilitación abarca un

amplio campo de aplicaciones, estando sujeto a diferentes connotaciones. Meyer et al. [7] proponen una descripción conceptual de rehabilitación, considerándola como una estrategia de salud basada en el modelo de la OMS. Dichas estrategias pueden ser diferentes entre sí, pero pueden compartir una serie de etapas para mejorar la condición de salud del paciente a lo largo del proceso de rehabilitación. Este proceso incluye identificar los problemas y necesidades del paciente, la relación de los problemas con los factores pertinentes de la persona y el ambiente, la definición de los objetivos de rehabilitación, la planificación y aplicación de las medidas y la evaluación de los efectos [18]. Éste proceso se denomina como el Ciclo de Rehabilitación, y de una manera simplificada está formado por cuatro pasos: valoración, asignación, intervención y evaluación.

En los últimos años, el desarrollo de sistemas de asistencia a la rehabilitación se ha centrado en este proceso como intervención (repetición de ejercicios), dejando de lado un paso tan relevante como la evaluación de los resultados [11]. Dicho paso es doblemente importante, ya que se realiza al inicio del ciclo de rehabilitación (diagnóstico) y al final del tratamiento (medición de resultados).

1.1. Automatización de Evaluación Funcional

Actualmente, el marco conceptual propuesto por la OMS de clasificación de funcionalidad, discapacidad y salud (CIF), es el modelo internacional predominante dentro de la rehabilitación neurológica para medir la salud y la discapacidad [17]. Según la CIF, la funcionalidad de una persona se puede clasificar en tres niveles: funcionalidad a nivel del cuerpo o parte del cuerpo, la persona completa y la persona completa en un contexto social. En consecuencia, la discapacidad implica disfuncionalidad en uno o más de estos mismos niveles: impedimentos, limitaciones de la actividad y restricciones de participación. Las herramientas de evaluación utilizadas en la evaluación funcional también se pueden clasificar de acuerdo con la CIF como se muestra en [13].

Considerando que la rehabilitación es un proceso laborioso y costoso, que su efectividad se mide usando escalas manuales objetivas pero cuya interpretación puede ser subjetiva, y que existen recursos inadecuados para pacientes con trastornos neurológicos en la mayor parte del mundo, se pone de manifiesto la necesidad de elaborar procesos de rehabilitación más autónomos y objetivos.

Otten et al. [12] proponen un método de evaluación usando sensores de bajo coste que registra datos de los movimientos del usuario. Las puntuaciones obtenidas en la evaluación fueron comparadas con las obtenidas con el Fugl-Meyer Assessment (FMA) mostrando resultados similares. De esta manera mostraron que el FMA se puede automatizar. Otro estudio para automatizar el FMA por medio de sensores se muestra en [16]. En [15] se propone una evaluación automática basada en la prueba llamada Wolf Motor Function Test (WMFT). Usando sensores que los usuarios deberían llevar encima (wearables), se estima el tiempo necesario para completar 7 de las 17 tareas de la prueba. Otro trabajo en curso se presenta en [5], que tiene como objetivo automatizar el Action Research Arm Test (ARAT). En dicho estudio, se ha desarrollado la automatización de la subprueba de comprensión del ARAT, mediante la sensorización de uno de los objetos utilizados en la tarea, en este caso un cubo de 7.5 cm.

En [3] se presenta la automatización del Box and Blocks Test (BBT) mediante una cámara Kinect para identificar el número de cubos transportados, obteniendo una tasa de éxito en el conteo del 90 % hasta 80 bloques. Por otro lado, una versión virtualizada del BBT se desarrolló por Cho et al. [1] usando una Kinect V1. Este sistema virtual presenta una correlación con el sistema real. Los dos sistemas anteriores son capaces de detectar la mano y sus movimientos moderadamente, sin embargo, la administración automática de la prueba no se aborda. Otra versión virtual del BBT fue desarrollada por Gieser et al. [2] usando un sensor Leap motion. Este sensor mejora altamente la detección de los movimientos de la mano y dedos, pero la administración automática de la prueba no se aborda. Esta limitación fue estudiada por Oña et al. [9], incluyendo además un entorno completamente inmersivo que fomenta la administración automática del BBT.

Así, se observa que varios trabajos se centran en la detección de movimientos de las extremidades superiores por medio de sensores que el paciente debe usar, sensorizando objetos usados en las pruebas, o a través de sistemas de visión por computadora. De esta manera, se busca obtener plataformas de evaluación automáticas que sean obje-

tivas, dinámicas, que muestren repetibilidad, capacidades de diagnóstico y que puedan proporcionar más información que las escalas tradicionales. Sin embargo, aún no se ha implementado un sistema automatizado completo y, por lo tanto, un sistema que se pueda administrar sin intervención de los médicos. La tecnología de RV puede contribuir a modelar la interacción paciente-terapeuta e incrementar la administración autónoma de las pruebas.

2. Metodología

La rehabilitación neurológica asistida por robots ha ido creciendo e incorporando avances en robótica junto con neurociencia y rehabilitación, para definir nuevos métodos de tratamiento de problemas relacionados con lesiones neurológicas. Una reciente revisión de la literatura en neurorehabilitación enfocada en la extremidad superior [8], ha relacionado la contribución de la robótica con el ciclo de rehabilitación (valoración, asignación, intervención y evaluación) y ha mostrado que para obtener procesos de rehabilitación más autónomos, debe existir una comunicación adecuada entre los componentes del proceso y aprovechar las métricas objetivas obtenidas por los sistemas robóticos. Esta metodología está ilustrada en la Figura 1.

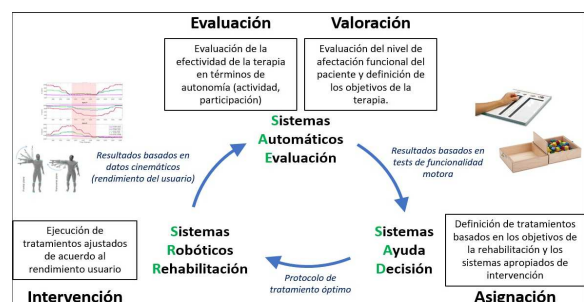


Figura 1: Metodología para automatización del Ciclo de Rehabilitación

En este contexto, la línea de trabajo presentada en este artículo abarca la automatización por medio de la realidad virtual de uno de los componentes principales del ciclo de rehabilitación: la evaluación automática de funcionalidad motora. De cara al desarrollo sistemas automatizados de evaluación, se deben considerar varios factores como el tipo de prueba, las métricas obtenidas y la aceptación tanto por los terapeutas como por los pacientes.

En la mayoría de casos, los métodos de evaluación se componen de ejercicios bien definidos (tareas específicas) basados en puntuaciones numéricas, que pueden ser susceptibles de ser automatizadas. Así mismo, aquellas pruebas que no requieran contac-

to físico con el terapeuta serán más adecuadas para automatizar. Este aspecto facilita que la interacción paciente-terapeuta se pueda modelar con un entorno virtual.

De esta manera, en este artículo se presenta el proceso de automatización de tres pruebas clínicas para medir la destreza manual, que cumplen con características como que: (a) la puntuación de la prueba es simple (métrica simple), (b) sus instrucciones son sistemáticas y claras, y el desarrollo de la prueba está bien definido (interacción paciente-terapeuta modelable), así como (c) un amplio uso en entornos clínicos como método de evaluación de la destreza manual en neurorehabilitación. Así, se han seleccionado escalas como el “Box and Blocks Test” (BBT), el “Clothespin Relocation Test” (CRT), y el “Peg Solitaire” para desarrollar versiones basadas en Realidad Virtual.

3. Sistemas Automatizados de Evaluación basados en RV

En esta sección se describe la automatización mediante la tecnología de videojuegos de las pruebas clínicas: Box and Blocks Test, Clothespin Relocation Test, y Peg Solitaire. Todas ellas, están enfocadas a evaluar el nivel de destreza manual fina.

3.1. Virtual Box and Blocks Test

El BBT es un sistema de medida unilateral de la destreza y coordinación manual, clínicamente validado [6]. El test utiliza una caja de madera con dos compartimentos cuadrados de 290 mm de lado, y 150 cubos de madera de 25 mm de arista. Entre los dos compartimentos se ubica una barrera de 100 mm de alto, que el usuario debe sobrepasar con su mano para que el conteo del cubo sea válido. La mecánica de la prueba es desplazar la mayor cantidad posible de cubos de un lado de la caja al otro en un minuto, primero con la mano dominante y después con la no dominante. Al finalizar cada etapa, el terapeuta cuenta manualmente el total de cubos desplazados para obtener la puntuación.

En la Figura 2 se muestra la versión virtual del BBT, en la que se han modelado la caja y los cubos manteniendo la escala real. También se ha modelado en el entorno virtual la verificación del cumplimiento de las reglas del BBT, que incluyen: la mano del individuo debe sobrepasar la barrera central de la caja, no se cuentan los cubos que sean lanzados desde una parte de la caja a la otra, y que el desplazamiento de cubos se debe realizar de uno en uno, y en caso de desplazar más de un cubo a la vez, se contarán como uno solo. Teniendo en cuenta lo anterior, y añadiendo botones de ayuda e

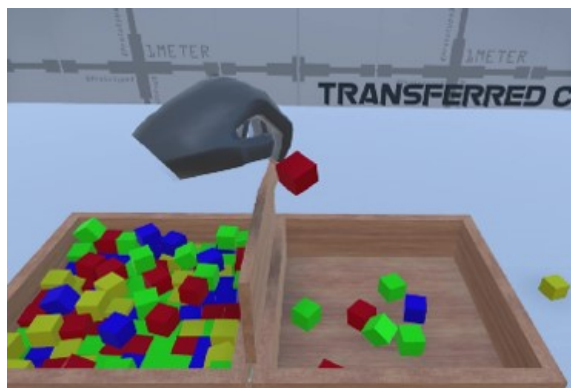


Figura 2: Versión virtual del BBT

instrucciones textual y auditivo, se puede realizar la prueba de forma autónoma y sin la supervisión de un terapeuta.

3.2. Virtual Clothespin Relocation Test

La prueba de Clothespin Relocation Test (CRT) es una herramienta establecida para entrenar la destreza de las extremidades superiores y se emplea en muchas áreas de la Terapia Ocupacional [4].

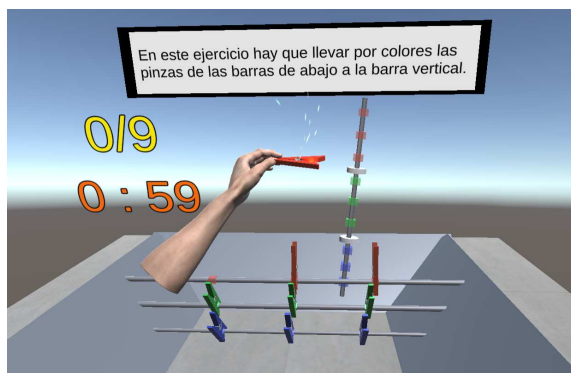


Figura 3: Sistema virtual basado en Clothespin

El sistema físico del CRT consiste en una bancada con barras colocadas de forma vertical y horizontal. La mecánica de la prueba es muy simple, el paciente quita pinzas para la ropa, una a la vez, de una barra horizontal y las coloca en una barra vertical (y viceversa). La Figura 3 muestra el sistema CRT desarrollado en RV, que mantiene las proporciones del sistema real. El CRT que permite al paciente realizar movimientos repetidos de alcance y pinzado coordinados mientras mueve el brazo en el espacio para reorientar la pinza para la ropa. La operación puede involucrar todas las articulaciones del brazo desde el hombro, además de necesitar precisión para ubicar las pinzas sobre la barra y soltarla.

La puntuación en la prueba real se basa en el tiempo que el paciente tarda en desplazar las pinzas

entre barras, y en la "forma" en la que lo ha hecho. Es decir, parte de la valoración se basa en la observación del terapeuta, que identifica si se emplean compensaciones. Este método basado en observación reduce la objetividad en la evaluación. Sin embargo, las características del entorno virtual permiten detectar las trayectorias de las manos y guardarlas permitiendo un análisis más cuantitativo y objetivo.

Una de las principales limitaciones del sistema virtual versus el sistema real es la pérdida del sentido de tacto al manipular la pinza. Esta limitación se ha intentado reducir al incluir realimentación auditiva y visual cuando se sujeta correctamente la pinza, como ha hecho en estudios similares con buenos resultados [10].

3.3. Virtual Peg Solitaire

El Peg Solitaire es un rompecabezas muy conocido, que puede resultar difícil a pesar de sus reglas simples. Consiste en un tablero en forma de cruz (en la versión inglesa) con 33 agujeros donde se insertan clavijas. Al inicio de la partida, las clavijas se colocan en todo el tablero de modo que quede solo un "agujero" vacío. Al hacer movimientos similares a damas o damas, las clavijas se eliminan gradualmente hasta que no sea posible realizar más movimientos o se logre alguna configuración de objetivo. La Figura 4 ilustra como se realiza un movimiento para eliminar una clavija (en la posición y).

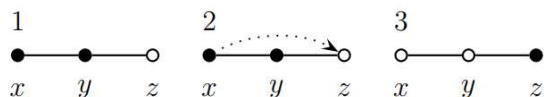


Figura 4: Ejemplo de movimiento en el Peg Solitaire

La versión virtual del juego se presenta en la Figura 5, donde se muestra el tablero y las clavijas en un instante de la partida. El juego está diseñado para ejecutarse de forma totalmente inmersiva. Para la detección de las manos, se ha usado el sensor Leap motion para una interacción natural, así como el uso de los "touch controllers" de las Oculus Rift S. El desarrollo del Peg Solitaire implica capacidad motora y cognitiva, para la manipulación de objetos pequeños, y para la planificación de los movimientos, respectivamente.

Ya que la dificultad para resolver el juego es elevada, se han diseñado varias configuraciones con menos dificultad para que el terapeuta pueda elegir si trabajar más el aspecto cognitivo o el motor. En cualquier caso, el sistema captura las trayectorias de las manos, así como el tiempo empleado

en el total de la partida y en cada movimiento, dotando al terapeuta de una mayor información para valorar la condición funcional del paciente.

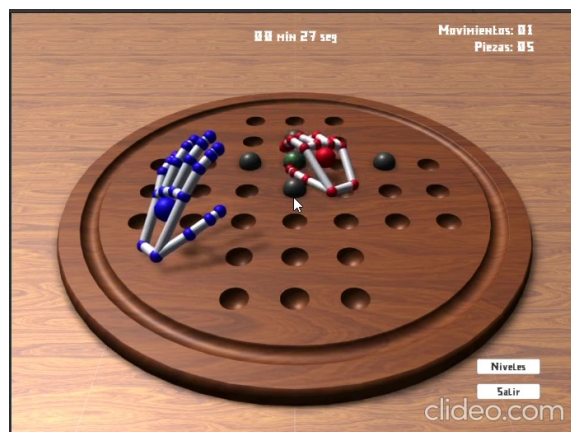


Figura 5: Versión virtual del Peg Solitaire

4. Viabilidad de la Evaluación Automática

En esta etapa de la investigación, la viabilidad de la evaluación funcional automatizada basada en el uso de sistemas con RV se ha estudiado para el sistema BBT. Para ello, se ha llevado a cabo un estudio piloto en un centro de salud para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson [10], incluyendo el VR-BBT como una de las herramientas para medir la destreza manual. Los resultados obtenidos de las evaluaciones de destreza manual con el BBT (manual) y con el VR-BBT (automático) se comparan para medir su correlación.

4.1. Descripción del estudio piloto

El estudio piloto fue realizado en la Asociación de Pacientes con Parkinson (APARKAN) en Alcorcón (Madrid), donde se reclutaron un total de 20 pacientes. En el ensayo, se pidió a cada participante que realizara tanto el BBT físico (una vez) como el VR-BBT (dos veces). El orden de las pruebas realizadas fue: (1) BBT físico, (2) VR-BBT (intento 1) y (3) VR-BBT (intento 2). El sistema virtual se probó dos veces para analizar la confiabilidad test-retest del VR-BBT. Se dio un período de descanso a los participantes entre intentos. El orden de los participantes para realizar el ensayo se definió aleatoriamente de acuerdo con el horario que mejor se adaptaba a cada participante. La administración de la BBT física se realizó de acuerdo a las instrucciones de la prueba [11]. Los participantes debían mover los cubos al otro lado de la caja durante 60 s y el evaluador contaba al final del tiempo los cubos que habían pasado. Tenga en cuenta que el BBT físico se realizó una vez y se

dió un período de descanso de cinco minutos antes de probar el VR-BBT.

Con respecto a la administración del VR-BBT, cada participante pasó por un proceso de ajuste para usar cómodamente el visor Oculus Rift S y ajustar la alineación de la lente para obtener el mejor enfoque óptico antes de la prueba. Este proceso de ajuste tomó aproximadamente cinco minutos en promedio para cada usuario. Una vez que los auriculares se colocaron correctamente, los participantes pudieron interactuar en el escenario de bienvenida durante cinco minutos. Posteriormente, se instruyó verbalmente a los participantes para que recogieran y movieran tantos cubos virtuales como fuera posible en el escenario de evaluación. Se recordó a los participantes que superaran la barrera central virtual con la mano. Por lo tanto, las instrucciones proporcionadas fueron similares a las recomendadas para el BBT físico. El tiempo de descanso entre los intentos con la mano menos afectada y la más afectada fue de un minuto. Se realizaron dos intentos con el VR-BBT para estimar la confiabilidad test-retest. Se dio un período de descanso de diez minutos entre los dos intentos.

4.1.1. Participantes

Se seleccionaron 20 personas con EP para participar en el estudio de acuerdo con los siguientes criterios de inclusión: pacientes con EP que cumplieran los criterios diagnósticos modificados del Banco de Cerebros de Reino Unido; pacientes en estadios II, III y IV de Hoehn & Yahr; sexo: hombres y mujeres; respuesta motora al tratamiento farmacológico estable o discretamente fluctuante; no recibir en el momento del estudio algún tratamiento específico de rehabilitación de las extremidades superiores; firma del consentimiento informado.

Los criterios de exclusión fueron: diagnóstico de otras enfermedades o lesiones graves que limitasen el desempeño ocupacional; pacientes que presentasen otros parkinsonismos diferentes a la EP; deterioro cognitivo que afectase a la capacidad de comprensión del lenguaje para el seguimiento de las instrucciones de las herramientas de evaluación del estudio; rechazo a participar en el estudio; encontrarse en los estadios evolutivos I o V de la escala de Hoehn & Yahr; alteraciones visuales no corregibles con dispositivos oculares.

4.2. Resultados

Los resultados obtenidos en este estudio se pueden valorar desde dos puntos de vista: fiabilidad de la medida y el valor de la información provista.

Por un lado, los resultados obtenidos con el sistema real BBT y el virtual VR-BBT se muestran en

la Figura 6. Las puntuaciones del BBT se muestran con la línea azul y se corresponden al conteo manual de los cubos desplazados. La puntuación del VR-BBT se muestran con la línea naranja (primer intento) y en gris (segundo intento), y se corresponden al conteo obtenido de forma automática para el mismo ensayo. Los resultados han sido agrupados según la mano dominante (MD) o no dominante (MND).

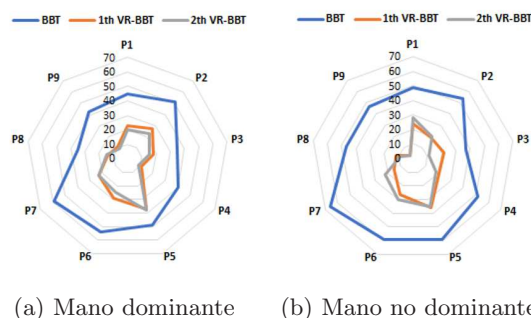


Figura 6: Comparación entre las puntuaciones obtenidas con el sistema físico (azul) y la versión virtual (naranja y gris) del BBT.

A simple vista, se puede observar que las puntuaciones conseguidas con el VR-BBT son inferiores en los dos intentos, tanto si el ensayo se realiza con la mano dominante o la no dominante. Sin embargo, también se puede apreciar visualmente que la repetividad en la medida en los dos intentos con el VR-BBT es elevada. Esto apunta a que la medición con el sistema físico y el virtual será diferente, pero que mantienen un error sistemático que se puede despreciar. Además, una ventaja del sistema virtual es que almacena información adicional para su análisis posterior, como las velocidades de desplazamiento o los instantes de tiempo en los que los cubos han sido transferidos.

En la Tabla 1 se muestran los niveles de correlación entre el BBT y el VR-BBT en la medición de destreza manual. Se ha obtenido un nivel de correlación de 0.49 para el caso de la mano más afectada, y un coeficiente de 0.51 para el caso de la menos dominante.

Tabla 1: Coeficientes de correlación Pearson's entre sistema real (BBT) y virtual (VR-BBT).

	BBT — VRBBT	
	$n = 20$	
Indicador	r	p
Lado más afectado	0.499	0.025 *
Lado menos afectado	0.510	0.022 *

* Significante en nivel 0.05 (2-tailed).

Considerando los anteriores niveles de correlación,

se puede observar que el error entre la medida manual y la automática es poco significativo. Este hecho sugiere que la información aportada por el método automático es igual de fiable que la manual, a pesar del error en la medida. El análisis en detalle de estos resultados se puede encontrar en [10].

5. Conclusiones

En este artículo se han presentado los avances en el desarrollo de sistemas de evaluación automáticos enfocados en la evaluación funcional de la extremidad superior utilizando realidad virtual. Se han presentado tres pruebas clínicas de evaluación funcional, y sus versiones implementadas en RV para abordar su administración automática.

Para estimar la viabilidad de una evaluación funcional basada en la tecnología de RV, se ha presentado el VR-BBT como un método de evaluación de la destreza manual gruesa. Para evaluar la viabilidad del sistema propuesto se llevó a cabo un ensayo piloto en un centro de salud.

Se ha mostrado que el VR-BBT se puede considerar una herramienta fiable para medir la destreza manual, teniendo en cuenta que hay una correlación significativa comparada con el sistema real, y la información adicional obtenida con el método automático. Además, la opinión de terapeutas que han usado el sistema destaca que la posibilidad de tener una herramienta como el VR-BBT, puede permitir mejorar la evaluación funcional enfocando la atención en el paciente y no en el desarrollo de la prueba. Por ejemplo, el médico puede detectar si el paciente realiza algún tipo de compensación para ayudar en el movimiento, como inclinar el tronco hacia adelante o forzar el hombro. De esta forma, la terapia de rehabilitación podría redireccionarse para corregir las afecciones que provocan estos movimientos inadecuados.

Así, los resultados obtenidos con el sistema virtual VR-BBT apoya el uso y aplicación de la tecnología de RV para la automatización de escalas de evaluación funcional, manteniendo la correlación con las escalas tradicionales y clínicamente aceptadas.

Agradecimientos

The research leading to these results has received funding from the the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness as part of the project: ROBOASSET: Intelligent robotic systems for assessment and rehabilitation in upper limb therapies” (PID2020-113508RB-I00), funded by AEI/10.13039/501100011033, and from the RoboCity2030-III-CM project (S2013/MIT-2748) which is supported in part by Programas de Acti-

vidades I+D en la Comunidad de Madrid, and in part by Structural Funds of the EU.

Esta publicación también es parte del proyecto de I+D+i PLEC2021-007819 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea ”NextGenerationEU/PRTR

English summary

AUTOMATED ASSESSMENT OF COORDINATION AND FINE MANUAL SKILLS USING SERIOUS GAMES

Abstract

Currently, functional evaluation procedures are characterized by being laborious, with little digitization of results, and reduced adaptability to the particular needs of patients. In this article, a novel line of research is presented focused on the automation of clinical scales for functional evaluation of the upper extremity using “serious games” and virtual reality (VR). The automation process using VR of three clinical scales such as the “Box and Blocks Test” (BBT), the “Clothespin Relocation Test” (CRT), and the “Peg Solitaire” widely used to measure the level of manual dexterity during neurorehabilitation.

Keywords: Virtual reality, Rehabilitation, Manual dexterity, Automation

Referencias

- [1] S. Cho, W.-S. Kim, N.-J. Paik, and H. Bang. Upper-limb function assessment using vbbs for stroke patients. *IEEE computer graphics and applications*, 36(1):70–78, 2016.
- [2] S. N. Gieser, C. Gentry, J. LePage, and F. Makedon. Comparing objective and subjective metrics between physical and virtual tasks. In *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality*, pages 3–13. Springer, 2016.
- [3] C.-P. Hsiao, C. Zhao, and E. Y.-L. Do. The digital box and block test automating traditional post-stroke rehabilitation assessment.

- In *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2013 IEEE International Conference on*, pages 360–363. IEEE, 2013.
- [4] P. Kyberd, A. Hussaini, and G. Maillet. Characterisation of the clothespin relocation test as a functional assessment tool. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, 5:2055668317750810, 2018.
- [5] T. K. Lee, K. Leo, S. Sanei, and E. Chew. Automated scoring of rehabilitative tests with singular spectrum analysis. In *Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2015 23rd European*, pages 2571–2575. IEEE, 2015.
- [6] V. Mathiowetz, G. Volland, N. Kashman, and K. Weber. Adult norms for the box and block test of manual dexterity. *American Journal of Occupational Therapy*, 39(6):386–391, 1985.
- [7] T. Meyer, C. Gutenbrunner, J. Bickenbach, A. Cieza, J. Melvin, and G. Stucki. Towards a conceptual description of rehabilitation as a health strategy. *Journal of rehabilitation medicine*, 43(9):765–769, 2011.
- [8] E. D. Oña, R. Cano de la Cuerda, P. Sánchez-Herrera, C. Balaguer, and A. Jardón. A review of robotics in neurorehabilitation: Towards an automated process for upper limb. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018 (Article ID 9758939):1–19, 2018.
- [9] E. D. Oña, J. A. García, W. Raffe, A. Jardón, and C. Balaguer. Assessment of manual dexterity in vr: Towards a fully automated version of the box and blocks test. In *Digital Health: Changing the Way Healthcare is Conceptualised and Delivered*, pages 57–62. IOS Press, 2019.
- [10] E. D. Oña, A. Jardón, A. Cuesta-Gómez, P. Sánchez-Herrera-Baeza, R. Cano-de-la-Cuerda, and C. Balaguer. Validity of a fully-immersive vr-based version of the box and blocks test for upper limb function assessment in parkinson’s disease. *Sensors*, 20(10): 2773, 2020.
- [11] E. D. Oña-Simbaña, P. Sánchez-Herrera Baeza, A. Jardón Huete, and C. Balaguer. Review of automated systems for upper limbs functional assessment in neurorehabilitation. *IEEE Access*, 7:32352–32367, 2019.
- [12] P. Otten, J. Kim, and S. H. Son. A framework to automate assessment of upper-limb motor function impairment: A feasibility study. *Sensors*, 15(8):20097, 2015. ISSN 1424-8220.
- [13] K. Salter, N. Campbell, M. Richardson, et al. Outcome measures in stroke rehabilitation. In *Evidence-Based Review of Stroke Rehabilitation*. Heart and Stroke Foundation. Canadian Partnership for Stroke Recovery, 2013.
- [14] D. Wade. Principles of neurological rehabilitation. In *Measurement in Neurological Rehabilitation*. Oxford University Press, 1992. ISBN 9780192619549.
- [15] E. Wade, A. R. Parnandi, and M. J. Mataric. Automated administration of the wolf motor function test for post-stroke assessment. In *Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth), 2010 4th International Conference on-NO PERMISSIONS*, pages 1–7. IEEE, 2010.
- [16] J. Wang, L. Yu, J. Wang, L. Guo, X. Gu, and Q. Fang. Automated fughl-meyer assessment using svr model. In *Bioelectronics and Bioinformatics (ISBB), 2014 IEEE International Symposium on*, pages 1–4. IEEE, 2014.
- [17] World Health Organization. *International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF)*. WHO, 2002. URL <http://www.who.int/classifications/icf/en/>. [Online] (Accessed October 2017).
- [18] World Health Organization. *Neurological disorders: public health challenges*. WHO, 2006. http://www.who.int/mental_health/neurology/neurodis (Accessed October 2017).
- [19] World Health Organization. *World report on disability*. WHO, 2011. http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/ (Accessed October 2017).



© 2022 by the authors. Submitted for possible publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).